

# Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P-Si Yapısının Co Gaz Algılama Özellikleri

Irmak KARADUMAN<sup>1</sup>, Nevin DEMİREL<sup>1</sup>, Dilber Esra YILDIZ<sup>2</sup>, Selim ACAR<sup>1</sup>

Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, ANKARA  
Hitit Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 19030, ÇORUM  
(Geliş / Received : 09.09.2014 ; Kabul / Accepted : 31.10.2014 )

## ÖZ

Bu çalışmada Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si yapısının gaz algılama özellikleri incelenmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal oksit yapısı atomik tabaka biriktirme (ALD) metoduyla üretilmiştir. Üretilen yapının farklı sıcaklıklar (300-450K) ve farklı CO gaz konsantrasyonlarında (50-2000 ppm) gaz algılama özellikleri incelenmiştir. Artan sıcaklık ve gaz konsantrasyonu ile duyarlılıklarda artış gözlenmiştir. Elde edilen grafikler göstermektedir ki gaz molekülleri ile numune yüzeyi arasında yük alışverişine dayalı bir etkileşme vardır. Ayrıca tepki ve geri dönüş süreleri sırasıyla 11 ve 16 s olarak hesaplandı.

**Anahtar Kelimeler:** Gaz Sensör, Metal Oksit Yarıiletken, CO

## The Co Gas Sensing Properties of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P-Si Structure

### ABSTRACT

In this study, The gas sensing properties of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si structure was investigated. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was made in by atomic layer deposition (ALD) method. The temperature dependent electrical characterization of produced sample was performed in gas atmosphere (carbon monoxide and carbon dioxide) at different temperatures (300-450 K) and different gas concentrations (50-2000 ppm ). The results show that the reaction between the gas molecules and the surface of the sample is based on the charge transfer mechanism. The response and recovery times are calculated 11 and 16 s, respectively.

**Keywords:** Gas Sensor, Metal Oxide Semiconductor, CO

### 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda dünyada ve ülkemizde artan sosyal faaliyetler, kalabalık insan kitlelerinin kapalı mekanlarda uzun süre bir arada bulunmaları, yanma işlemleri sırasında yanmanın tam gerçekleşmemesi sonucu açığa çıkan zararlı gazlar gibi etkenler çevreyi kirletmekte, hava kirlenmelerini arttırmakta ve bundan dolayı insan sağlığı da etkilenmektedir [1].En yaygın ve en zararlı hava kirlenmelerin başında karbonmonoksit (CO) gazı gelmektedir. Tatsız, renksiz, kokusuz olması ve tahriş etme özelliğinin olmaması nedeni ile fark edilmediği için insan sağlığı üzerinde oldukça öldürücü etkilere neden olmaktadır. Yoğunluğu hava yoğunluğunun %96,5'i kadardır. Bu nedenle daha çok atmosferin alt tabakalarında bulunmaktadır. Otomobil egzoz gazlarında önemli oranda karbon monoksit çıkmaktadır. Ayrıca yanmanın iyi olmadığı diğer bütün aktiviteler sonucunda da (fabrika, gemi, lokomotif, kalorifer bacalarından) önemli oranda karbon monoksit çıkmakta ve atmosfere karışmaktadır. En önemlisi karbonmonoksit, insanlar tarafından solunduktan sonra akciğerler aracılığıyla kana geçmekte ve kırmızı kan hücrelerinin içerisinde bulunan ve dokulara oksijen taşıyan hemoglobine oksijenden ortalama 200 kat daha hızlı bağlanmaktadır. Karbonmonoksitin hemoglobine birleşmesi sonucu karboksihemoglobin (COHb) oluşmakta, vücudumuzda yer alan oksijen azalması karbonmonoksit ile yer değiştirmekte ve kalp,

beyin ve diğer organlarımız çalışamaz hale getirmektedir [2].Bu nedenle CO gibi zararlı ve öldürücü gazların algılanması, kontrolün sağlanması, özellikle insanların güvenliği ve sağlığı için önem taşımaktadır [3]. Yaşanılan ortamın hava kalitesinin iyi olması sağlık açısından çok önemli olduğundan bilim insanları çeşitli gaz sensörleri geliştirerek havada bulunan zehirli gazların tespit edilmesi ve bunların bir takım yöntemlerle bertaraf edilmesi konusunda yoğun bir şekilde çalışmaktadırlar [4].

Gaz sensörünün temel algılama mekanizması yüzeye gönderilen kuru hava ile hedef gaz arasındaki kimyasal reaksiyonlardır. Bu reaksiyonlar algılama yüzeyindeki taşıyıcıları değiştirmekte, böylece sensör sinyali elde edilebilmektedir. Gaz sensörleri yapısında yarıiletken malzemeler gün geçtikçe daha çok tercih edilmektedir. Yarıiletken gaz sensörlerinde diğer gaz sensörlerinde farklı olarak elektrik direncinin direkt ölçülmesi ile hedef gaz konsantrasyon değişimi nicel bir şekilde yapılabilir [5-7]. Metal oksitler; işlevsel malzemeler, aygıtlar ve sistemlerin gelişmesinde temel oluştururlar. Oksitlerin, değişken katyon değerliği ve ayarlanabilir oksijen eksikliği olmak üzere kendilerine has iki yapısal özelliği vardır. Bu özellikler sayesinde yeni ve ayarlanabilir elektriksel, kimyasal, optiksel ve manyetik özelliklere sahip malzemeler elde edilebilir. Farklı üretim metotları, katkılama, farklı kontak materyalleri, farklı metal oksit yüzeylerinin kullanılması MOS gaz sensörlerinin duyarlılıklarına etki etmektedir. Yapılan literatür çalışmaları göstermektedir ki farklı üretim metotları farklı du-

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

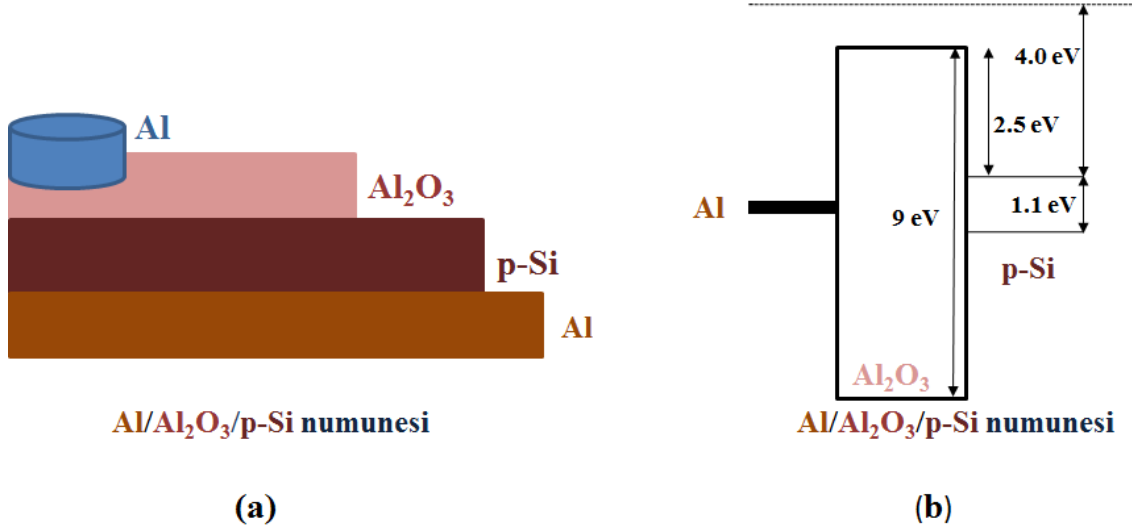
e-posta: karaduman.irmak@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2015.18.2, 79-84

yarlılıklara yol açmaktadır [8-9]. Bu üretim metodlarının başında ALD metodu gelmektedir. ALD metodu yarıiletken filmleri istenilen kalınlıkta ve yoğunlukta üreterek, gaz sensörü uygulamalarında pek çok avantaj sağlamaktadır [10-11]. Çoğu gaz sensörlerinin çalışma sıcaklığı oldukça yüksektir. Çalışma sıcaklığının yüksek olması, yüksek güç tüketimine ve yüksek maliyete sebep olmaktadır. Son yıllardaki çalışmalarda oda sıcaklığında duyarlılık gösteren, düşük güç tüketimi yapan sensörlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir [12]. Bu çalışmada, ALD metodu ile üretilen Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si nu-

minyum buharlaştırıldı. Daha sonra tavlama sistemi kullanılarak, 450 °C 5 dk Al tavlandı ve böylece Al Si içerisine çöktürülerek metal/yarıiletken arayüzeyinde omik kontak yapıldı

Bu çalışmada, pürüzsüz ince film oksit tabaka (TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> vb.) üretiminde güvenle kullanılan bir cihaz [10-11] olduğu için ALD Savannah S300 sistem tercih edildi. Omik kontakın oluşturulmasından sonra parlak Si yüzeyine 25 Å Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oksit tabaka, yüksek vakumlu ALD Savannah S300 sistemi kullanılarak



Şekil 1. Numunenin Şematik Diyagramı (The Schematic Diagram of Sample)

munenin CO gazına karşı gaz algılama özellikleri düşük sıcaklık aralığında incelenmiştir. Ölçümler, 300-450 K arasında 50 ppm gaz konsantrasyonu için incelenmiş ve 450 K'de maksimum duyarlılık sergilediği gözlenmiştir. 450 K sıcaklıkta 50-2000 ppm gaz konsantrasyonu aralığında ölçümler alınmıştır. Numunenin duyarlılığının, sıcaklık ve gaz konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği açıkça görülmektedir.

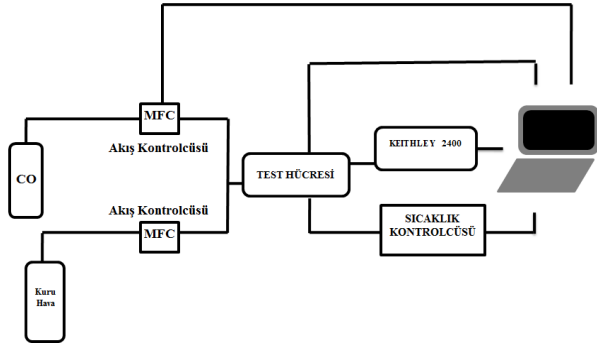
## 2. DENEYSEL SİSTEM (EXPERIMENTAL SETUP)

(111) yönelimli, 300 Ωm kalınlıktaki ve 5-10 Ω.cm öz-dirençli p tipi silisyum (Si) yaparak kullanılarak Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si Schottky diyot oluşturuldu. Temizleme işleminde kullanılacak tüm beherler ve tutucular deiyonize su (18 MΩ.cm) ile temizlenip saf (%99.999) azot gazı ile kurutuldu. Daha sonra silisyum yaprak, trikloretilen (CHCl<sub>3</sub>), aseton (CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>) ve metanol (CH<sub>3</sub>OH) ile temizlendi. Kimyasal aşındırma için birbiri ardına H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, %20 HF ve HNO<sub>3</sub>, HF, H<sub>2</sub>O (6:1:3) uygulandı ve tekrar Si yaprak deiyonize su (18 MΩ.cm) ile yıkandı. Diyot için gerekli omik ve doğrultucu kontaklar termal buharlaştırma sistemi kullanılarak oluşturuldu. Öncelikle omik kontak için yüksek safliktaki (%99.999)alüminyum(Al), termal buharlaştırma sistemindeki tungsten flaman üstüne konuldu. 10<sup>-6</sup>Torr basınca ulaşıldığında flaman üzerinden akım geçirilerek yarıiletkenin mat yüzeyine 2000 Å kalınlığında alü-

minyum buharlaştırıldı. Daha sonra, 2 mm çaplı delikler açılmış çelik maske Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üzerine yerleştirildi ve doğrultucu kontak için tekrar termal buharlaştırma sistemi kullanılarak 2000 Å kalınlığındaki Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüzeye buharlaştırıldı. Böylece Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si Schottky diyot elde edildi.

Gaz sensör ölçüm sistemi, Keithley 2400 akım gerilim ölçüm sistemi, LakeShore 325 sıcaklık kontrol ünitesi, test hücresi, mikser ve ALICAT MC serisi gaz akış kontrolcülerinden oluşmaktadır. Zamana ve gaz konsantrasyonuna bağlı direnç ölçüm sistemi bilgisayar kontrollüdür. LakeShore 325 sıcaklık kontrol ünitesi PID sistemle sıcaklık kontrolü yapabilmektedir. Gaz akış kontrolcüsü, vakumlanabilir hücreye giren gazın akış hızını yüksek duyarlılıkta ayarlanmasını sağlamaktadır. Gaz akış kontrolcüsünün birinden kuru hava diğerinden etkisi incelenecek gaz geçmektedir ve bu kontrolcüler sayesinde gazın akış hızı istenilen seviyede sabit tutulmaktadır. Hazırlanan bilgisayar programı gaz akış kontrolcülerini ve KEITHLEY 2400 akım gerilim ölçüm sistemini birlikte kontrol etmektedir. Bu amaçla sıcaklığa bağlı olarak gaz duyarlı direnç ölçümlerini yapabilmek için test hücresi sisteme uygun hale getirilmiştir. Hücre içerisine giren gaz miktarı milyonda bir (ppm) cinsinden istenilen düzeyde ve yüksek hassasiyette olmak üzere zamana bağlı olarak istenilen zaman aralıklarında açılıp kapanmakta bu

esnada ise akım gerilim sistemi ölçüm yapabilmektedir. Program sayesinde bu ölçümlerin akım-zaman grafikleri bilgisayar ekranına eş zamanlı olarak aktarılmaktadır. Ölçümlere başlanmadan önce numuneyi kararlı hale getirebilmek için 30 dakika boyunca hücre içerisine kuru hava gönderilmiştir. Kuru havanın akış hızı, aynı koşullar altında farklı konsantrasyon davranışlarını gözlemleyebilmek için daima sabit tutulmuştur. Şekil 2’de ölçüm sisteminin şematik diyagramı verilmiştir.



Şekil 2. Deneysel Düzeneğin Şematik Diyagramı (The Schematic Diagram of Measurement Setup)

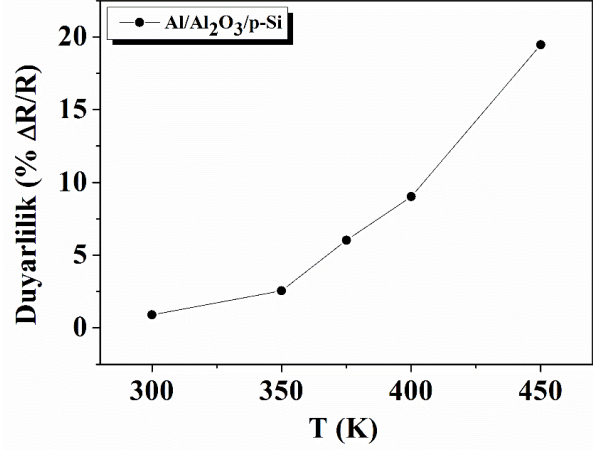
### 3. SONUÇ VE TARTIŞMA (Results and Discussion)

Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si yapısının gaz algılama özelliklerinin incelenmesi için ilk olarak optimum çalışma sıcaklığı tespit edilmelidir. Bir gaz sensörünün çalışma sıcaklığı, sensörün duyarlılık tespitindeki başlıca faktörlerden birisidir. Hedef gaz molekülleri artan sıcaklık ile birlikte yüzeyden desorbe edilir. Sıcaklığın artırılması yüzey reaksiyonları ve kayda değer bir duyarlılık elde etmek için gereklidir [13]. Bu sebeple gaz algılama özellikleri incelenen numunelerin çalışma sıcaklıklarının tespit edilmesi gereklidir. Çalışma sıcaklığının tespit edilebilmesi için 300 – 450 K sıcaklık aralığında 2000 ppm CO gaz konsantrasyonunda gaz algılama özellikleri incelenmiştir. Numunenin CO gazına karşı gösterdiği duyarlılıklar hesaplanırken;

$$\text{Duyarlılık} = \frac{R_g - R_h}{R_g} \times 100\% \quad (1)$$

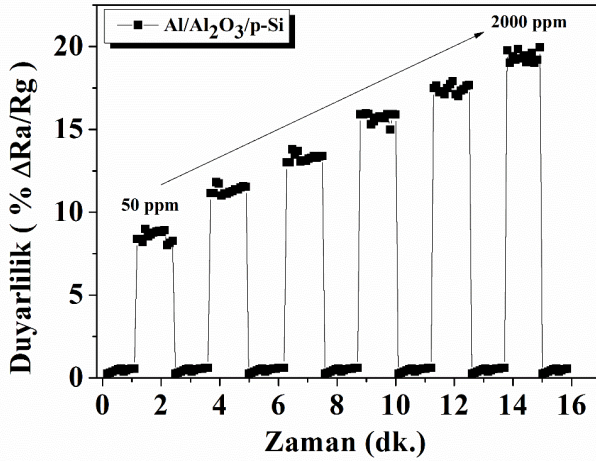
formülü kullanılmıştır [13].  $R_g$ , gaz ortamında numunenin direncini gösterirken  $R_h$  hava ortamında numunenin direncini vermektedir. Şekil 3’de farklı sıcaklıklarda numunenin CO gazına karşı gösterdiği duyarlılık-sıcaklık grafiği verilmiştir. 300K sıcaklıkta numunede CO gazına karşı kayda değer bir duyarlılık gözlenmemiştir [ $\sim$  %0,9]. Numune 350K sıcaklıkta CO gazına karşı tepki %2,18’lik duyarlılık sergilerken, sıcaklık arttıkça duyarlılık artmış ve 450K sıcaklıkta %20’lerde duyarlılık gözlenmiştir. Sıcaklık artışı ile yapıdaki elektronlar enerji kazanmakta ve akım iletimi meydana gelmektedir. Bu yüzden sıcaklık arttıkça duyarlılıkta artış gözlenmektedir. Belirli bir sıcaklığın altında duyarlılığın olmamasının asıl nedeni elektriksel olarak kararsızlıktır. Elektriksel kararsızlığın sebebi ortamdaki karışık oksit fazlarıdır ve buna bağlı olarak

çalışma sıcaklığının etkisi ile kimyasal olarak adsorblanan moleküler oksijen tipi  $O^{2-}$ ,  $O^-$  veya  $O_2^{2-}$  şeklinde olup yüzeydeki taşıyıcı elektron sayısını değiştirmeleridir. Sıcaklık artışı ve karışık oksit fazlarının azalması ile birlikte kararsızlık kaybolmaktadır [14-16].



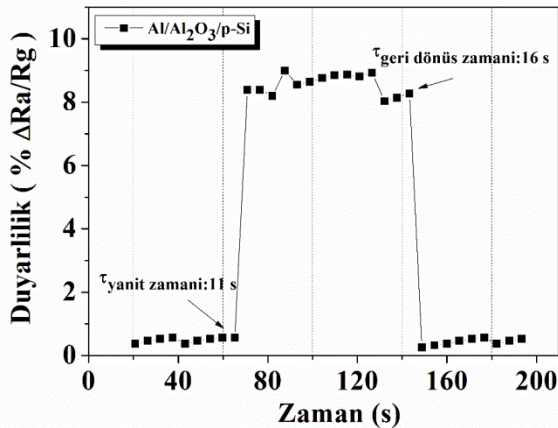
Şekil 3. 2000 ppm CO gazı için Duyarlılık-Sıcaklık Grafiği (Response-Temperature Graphs for 2000 ppm CO gas)

Choi ve ark., PE-ALD metodu ile farklı kalınlıklarda SnO<sub>2</sub> ince film üretmişler ve CO gazına karşı 200-500 °C’ de maksimum duyarlılık elde etmişlerdir. Sıcaklık fazla artması (T>500 °C) ve azalması (T<200°C) iletkenlik üzerinde değişimlere yol açmıştır [17]. Nagai ve ark., Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> numunelerinin CH<sub>4</sub> gaz algılama özelliklerini incelemişler ve 400 °C ‘de 1 ppm CH<sub>4</sub> gazı için duyarlılık elde ettiklerini rapor etmişlerdir [18]. Ancak çalışma sıcaklığının çok yüksek olması, ( T> 500°C), numune yüzeyi üzerindeki algılama bölgelerinde adsorbe oksijen moleküllerini azaltılabilir ve daha az duyarlılık gösterilmesine yol açabilir. Ayrıca yüksek sıcaklıklar yüksek güç tüketimine yol açmakta ve numunenin ömrünü kısaltmaktadır [19]. Bu sebepten numunenin gaz algılama özellikleri araştırılırken sıcaklık 450K sabit tutulmuştur. Şekil 4’de farklı gaz konsantrasyonlarında (50-2000 ppm) Numunenin CO gazına karşı gösterdiği Duyarlılık-Zaman grafiği verilmiştir. CO gazı için eşik değeri 50 ppm’dir ve bu eşik değerinde duyarlılık elde etmek gereklidir. Numune 50 ppm CO gaz konsantrasyonunda %9 duyarlılık göstermiştir. Gaz konsantrasyonu arttıkça duyarlılıkta artış görülmektedir. Gaz konsantrasyonu arttıkça daha fazla oksijen molekülü CO gazı ile reaksiyona girmekte ve duyarlılıkta artmaya neden olmaktadır [20]. Tekrarlanabilirlik ve kararlılık gaz algılama uygulamalarının temel parametreleridir [21]. Her bir gaz konsantrasyonu için ölçümler 3 kez tekrar edilmiştir. Her bir ölçüm sonrasında numune havaya maruz kaldığında başlangıç değerine dönmüştür. Her bir periyot sonrasında numunenin başlangıç değerine dönmesi, numunenin CO atomlarından hemen temizlenebilmiş olmasına bağlıdır.



Şekil 4. 50-2000 ppm CO gazı için Duyarlılık-Zaman Grafiği (Response-Time Graphs for CO gas from 50 ppm to 2000 ppm)

Ryzhikov ve ark., SnO<sub>2</sub> (Pd katkılı) metal oksit yüzeyine Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yapısını aerosol pyrolysis metodu ile büyütmişler ve yapıya %3 ve %6 Ru katkılayarak oluşturulan yapıları CO, H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> gazlarına karşı gösterdiği duyarlılık incelenmiştir. 300 ppm CO gazı için, %3 katkılı Ru yüzeyinde %17,8 duyarlılık elde edilirken, %6 katkılı Ru yüzeyde %16,6 duyarlılık elde edilmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yapısı katalizör görevinde kullanılmış ve katkılama ile özellikleri artırılmıştır [22]. Mohommadi sol-jel metoduyla TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yapısı üretmiş ve bu yapının CO gaz algılama özelliklerini rapor etmiştir. 400 °C'de 25 ppm CO gazı için duyarlılık elde etmişlerdir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> yapının anataz fazından rutile fazına geçişini geciktirmiş ve gaz algılamada katalizör görevi göstermiştir [23]. Şekil 5'de ise numunenin 50 ppm CO gazına karşı gösterdiği tepki ve geri dönüş yanıtları hesaplanmıştır. Numunenin tepki zamanı 11 sn hesaplanırken, geri dönüş zamanı 16 sn olarak hesaplanmıştır. Grafikten açıkça görülmektedir ki numunenin algılama ve geri dönüş mekanizmaları oldukça hızlıdır. Bu numunenin CO gazını hemen algılayabildiğinin bir göstergesidir.

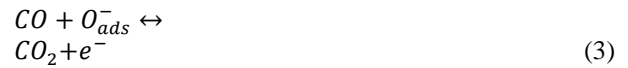


Şekil 5. Yanıt ve Geri Dönüş Zamanı (50 ppm CO gaz konsantrasyonu) (Response and Recovery Times for 50 ppm CO gas concentrations)

Metal-oksit-yarıiletken gaz sensörlerinde, temel çalışma prensibi yüzey ile gaz molekülü arasındaki yük alışverişine dayalıdır. Elektronlar iletkenlik bandından adsorbe edilmiş oksijenlere transferi sonucunda yüzeye oksijen tutunur ve bu bir yük azalma bölgesi (uzay yük bölgesi) oluşturulmasına sebep olur. Bu azalma bölgesi iletkenlik bandındaki elektronların yoğunluğuna ve oksijen parçacıklarının sayısına bağlıdır. Oksijen yarıiletken için bir yüzey tuzağıdır. Oksijenin yüzeye tutunma reaksiyonu aşağıdaki gibidir [24-26].



İndirgeyici bir gaz, potansiyel engeline (tanecikler arasında) bir azalma meydana getirirken oksitleyici bir gaz ise potansiyel engeline (tanecikler arasında) bir artış meydana getirir. O<sup>-</sup> iyonları, gönderilen gaz ile reaksiyona girerek, gazın cinsine göre (indirgeyici veya yükseltgeyici) elektronları iletkenlik bandına salar veya iletkenlik bandından koparır. Böylelikle elektriksel dirençte bir değişim meydana gelir [27]. CO gazı indirgeyici bir gazdır [28]. CO molekülleri, oksijen molekülleri ile reaksiyona girerek ortama elektron salar. Reaksiyon aşağıdaki gibidir [29].



Bu reaksiyon ortamdaki elektron konsantrasyonunu arttırmakta ve duyarlılıkta değişime yol açmaktadır. Sıcaklık arttıkça CO molekülleri ile oksijen molekülleri arasındaki reaksiyon hızlanmakta ve daha yüksek duyarlılıklar elde edilmesine neden olmaktadır. Grafiklerden açıkça görülmektedir ki gaz sensörünün duyarlılığı, sıcaklık ve gaz konsantrasyonu ile değişmektedir. Metal-oksit-yarıiletken gaz sensörleri, hedef gaz ile sensör yüzeyindeki etkileşimleri ile tanımlanırlar. Daha iyi bir yüzey alanı oluşturulması, daha güçlü etkileşimlerin olmasını sağlayarak daha yüksek duyarlılık elde edilmesini sağlayacaktır [30-31]. Daha iyi bir yüzey alanı oluşturulmasının en önemli parametrelerden birisi de numunenin elde edilmesinde kullanılan yöntemdir. Farklı metodlarla üretilen metal oksitlerde farklı duyarlılıklar elde edilebilmektedir [8-9, 32-33]. Üretim tekniklerindeki farklılık metal-oksit gaz sensörlerinin elektriksel özelliklerinde farklılıklar yaratmaktadır. Son yıllarda en gelişmiş metodlardan birisi ise atomik tabaka biriktirme (ALD) metodudur. ALD, ardışık doygun yüzey reaksiyonları tabanlı bir kimyasal buhar biriktirme metodudur. Her seferinde bir öncül madde yüzeye gönderilir ve tek tabaka ile yüzey doygun hale getirilir. Bu özelliği ile diğer kimyasal buhar metodlarından ayrılır. Bu kendini sınırlayan mekanizma ile konformal ve kontrol edilebilir numuneler üretilir. ALD kendini sınırlayan bir işlem olduğundan, her döngüde büyütme kesin olarak bilinebilir, böylece kesin bir kalınlık kontrolüne izin verir. ALD metodu, tüketim bölgesi etkilerini ve film kalınlığının kontrol edilebilir olduğundan dolayı arttırmaktadır [34,35]. Hara ve ark., SrTiO<sub>3</sub> ince filmlerini ALD metodu ile üretmişler ve ppb

seviyesinde oksijen gazını (O<sub>2</sub>) algıladıklarını rapor etmişlerdir (0,2-0,21 ppm O<sub>2</sub>). UV ışık etkisi ile oda sıcaklığında O<sub>2</sub> gazına karşı önemli direnç değişimleri elde ettikleri bildirmişlerdir. ALD metodu ile üretilen SrTiO<sub>3</sub> filmlerin geniş çaplı gaz sensörü uygulamalarında kullanılabilceğini göstermişlerdir [36]. Karaduman ve ark., ALD metodu ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> malzemelerini üretmişler ve bu malzemelerin UV ışık altında NO<sub>2</sub> gazına karşı gösterdiği duyarlılıkları incelemişlerdir. ALD metodu ile üretilen numunelerin gaz sensörü uygulamalarında önemli avantajları olduğunu vurgulamışlardır [37]. Cho ve ark., ALD metodu, O<sub>2</sub> plazma ve tavla işlemi ile farklı kalınlıklarda (10-30-50 nm) ZnO nanotube üretmişler ve 10-100 ppm ethanol gaz konsantrasyonu aralığında numunenin duyarlılıklarını rapor etmişlerdir. Yaptıkları çalışma göstermektedir ki ALD metodunun sağladığı kontrol edilebilir kalınlık, ZnO nanotüp üretiminde ve yüksek duyarlılık elde edilmesinde etkisi oldukça yüksektir [38].

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, ALD metodu ile üretilen Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si numunesinin CO gaz algılama özellikleri araştırılmıştır. 300-450K sıcaklıklar arasında 2000 ppm CO gazına karşı duyarlılıklar incelenmiş ve 450K'de maksimum duyarlılıklar elde edilmiştir. Gaz algılama özellikleri 450 K sıcaklıkta yapılmış ve 50-2000 ppm CO gaz konsantrasyonlarında ölçümler alınmıştır. Numune 50 ppm CO gazına karşı %9 duyarlılık göstermiştir. Bu numunenin duyarlılığı sıcaklık ve farklı gaz konsantrasyonlarına bağlı olduğu açıktır. Elde edilen grafikler göstermektedir ki gaz molekülleri ile numune yüzeyi arasında yük alışverişine dayalı bir etkileşme vardır. Ortamda gaz yok iken numune yüzeyinde adsorbe edilmiş O<sub>2</sub> molekülleri bir elektron tüketim bölgesi oluştururlar. Numune gaz molekülleri ile etkileştiğinde, O<sub>2</sub> molekülleri de gaz ile etkileşir ve O<sub>2</sub> molekülleri yüzeyden atılmaya başlar. O<sub>2</sub> moleküllerinin yüzeyden ayrılması ile gazın özelliğine göre (indirgeyici veya yükseltgeyici) elektron salınır veya numuneden bir elektron koparılır. Böylelikle iletkenlikte değişim gözlenir. Numunelerin algılama hızları ve geri dönüş mekanizmaları da oldukça çabuk olmuştur. Geri dönüş süreleri göstermektedir ki gazlar ile numune yüzeyi arasındaki ana mekanizma oldukça hızlıdır. Yapılan çalışma sonucu, ALD metodu ile üretilen metal oksit malzemelerin gaz sensörü uygulamalarında kullanılabilceği gösterilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi BAP 05/2010-58 kodlu proje ve Hitit Üniversitesi BAP FEF01.13.003. kodlu proje tarafından desteklenmiştir.

#### 5. KAYNAKÇA (REFERENCES)

- Yeşilyurt C., Akcan N., T.C. Sağlık Bakanlığı Refik Saydam Hıfzıssıhha Merkezi Başkanlığı Çevre Sağlığı Araştırma Müdürlüğü, Ankara, 3-10 (2001).
- Peavy H.S., Rowe D.R., Tchobanoglous, G., McGraw, Hill Inc., Singapore, (1985).
- Ertürk F., Okutan H., Marmara Araştırma Merkezi, Kimya Mühendisliği Araştırma Bölümü, Gebze-Kocaeli, 15-47 (1993).
- Korotcenkov G., Brinzari V., Cerneavski A., Golovanov V., in: **Proceedings of the Programme and Abstracts of the III International Seminar on Semiconductor Gas Sensors**, SGS'2002, Ustron, Poland, 19-22 September 2002, p. 30.
- Licznerski B.W., Nitsch K., Teterycz H., Wisniewski K., *Sens. Actuators B*, 79: 157-162, (2001).
- Al-Kuhaili M.F., Durrani S.M.A., Bakhtiari I.A., 'Carbon monoxide gas-sensing properties of CeO<sub>2</sub>-ZnO thin films', *Applied Surface Science* 22 (5):, 3033-3039, (2008).
- Durrani S.M.A., Al-Kuhaili M.F., Bakhtiari I.A., 'Carbon monoxide gas-sensing properties of electron-beam deposited cerium oxide thin films', *Sens. Actuators B* 134: 934-939, (2008).
- Kim I.J., Han S.D., Han C.H., Gwak J., Lee H.D., Wang J. S., 'Micro Semiconductor CO Sensors Based on Indium-Doped Tin Dioxide Nanocrystalline Powders', *Sensors*, 6: 526-535, (2006).
- Coppedè N., Villani M., Mosca R., Iannotta S., Zappettini A., Calestani D., 'Low Temperature Sensing Properties of a Nano Hybrid Material Based on ZnO Nanotetrapods and Titanyl Phthalocyanine', *Sensors*, 13: 3445-3453, (2013).
- Choi G., Satyanarayana L., 'Effect of process parameters on surface morphology and characterization of PE-ALD SnO<sub>2</sub> thin films for gas sensing', *J. Park, Appl. Phys. Lett.*, 252: 7878-7883, (2006).
- Du X., George S.M., 'Thickness dependence of sensor response for CO gas sensing by tin oxide films grown using atomic layer deposition', *Sens. Actuators B*, 135: 152-160, (2008).
- Abdullah Q.N., Yam F.K., Hassan Z., Bououdina M., 'Hydrogen gas sensing performance of GaN nanowires-based sensor at low operating Temperature', *Sens. Actuators B*, 204: 497-506, (2014).
- Hassan J.J., Mahdi M.A., Chin C.W., Abu-Hassan H., Hassan Z., 'A high-sensitivity room-temperature hydrogen gas sensor based on oblique and vertical ZnO nanorod arrays', *Sens. Actuators B*, 176: 360-367, (2013).
- Sharma A., Tomar M., Gupta V., 'A low temperature operated NO<sub>2</sub> gas sensor based on TeO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> p-n heterointerface', *Sens. Actuators B*, 176: 875-883, (2013).
- Shao C., Chang Y., Long Y., 'High performance of nanostructured ZnO film gas sensor at room Temperature', *Sens. Actuators B*, 204: 666-672, (2014).
- Su P.-G., Peng Y.-T., 'Fabrication of a room-temperature H<sub>2</sub>S gas sensor based on PPy/WO<sub>3</sub> nanocomposite films by in-situ photopolymerization', *Sens. Actuators B*, 193: 637-643, (2014).

- 17) Choi G., Satyanarayana L., Park J., 'Effect of process parameters on surface morphology and characterization of PE-ALD SnO<sub>2</sub> thin films for gas sensing', *App. Surf. Science*, 252: 7878–7883, (2006).
- 18) Nagai D., Nishibori M., Itoh T., Kawabe T., Sato K., Shin W., 'Ppm level methane detection using microthermoelectric gas sensors with Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> combustion catalyst films', *Sens. Actuators B*, 206: 488–494, (2015).
- 19) Wang C., Yin L., Zhang L., Xiang D., Gao R., 'Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors', *Sensors*, 10: 2088–2106, (2010).
- 20) Nguyen L.Q., Phan P.Q., Duong H.N., Nguyen C.D., Nguyen L.H., 'Enhancement of NH<sub>3</sub> Gas Sensitivity at Room Temperature by Carbon Nanotube-Based Sensor Coated with Co Nanoparticles', *Sensors*, 13: 1754–1762, (2013).
- 21) Korotcenkova G., Cho B.K., 'Instability of metal oxide-based conductometric gas sensors and approaches to stability improvement (short survey)', *Sens. Actuators B*, 156: 527–538, (2011).
- 22) Ryzhikov A., Robaut F., Labeau M., Gaskov A., 'New gas sensitive MIS structures Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M= Pt, Rh)/Si with a granular dielectric layer', *Sens. Actuators B*, 133: 613–616, (2008).
- 23) Mohammadi M.R., 'Semiconductor TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film gas sensors derived from aqueous particulate sol-gel process', *Mat. Science in Semiconductor Processing*, 27: 711–718, (2014).
- 24) Patil, D.R., Patil, L.A., Amalnerkar, D.P., 'Ethanol Gas Sensing Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped ZnO Thick Film Resistor', *Indian Academy of Sciences, Bull. Mater. Sci.*, 30 (6): 553–559, (2007).
- 25) Hübner, M., Simion, C.E., Haensch, A., Barsan, N., Weimar, U., 'CO sensing mechanism with WO<sub>3</sub> based gas sensors', *Sens. Actuators B*, 153: 103–106, (2010).
- 26) Zhang L., Tian F.-C., Peng X.-W., Yin X., 'A rapid discreteness correction scheme for reproducibility enhancement among a batch of MOS gas sensors', *Sens. Actuators A*, 205: 170–176, (2014).
- 27) Liu Y., Lei Y., 'Pt-CeO<sub>2</sub> nanofibers based high-frequency impedancemetric gas sensor for selective CO and C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> detection in high-temperature harsh environment', *Sens. Actuators B*, 188: 1141–1147, (2013).
- 28) Durrani S.M.A., Al-Kuhaili M.F., 'Effect of biasing voltages and electrode metals and materials on the sensitivity of electron beam evaporated HfO<sub>2</sub> thin film CO sensor' *Mater. Chem. Phys*, 109: 56–60, (2008).
- 29) Durrani S.M.A., 'CO-sensing properties of hafnium oxide thin films prepared by electron beam evaporation', *Sens. Actuators B*, 120: 700–705, (2007).
- 30) Zhang H.-D., Long Y.-Z., Li Z.-J., Sun B., 'Fabrication of comb-like ZnO nanostructures for room-temperature CO gas sensing application', *Vacuum*, 101: 113–117, (2014).
- 31) Niskanen A.J., Varpula A., Utriainen M., Natarajan G., Cameron D.C., Novikov S., Airaksinen V.-M., Sinkkonen J., Franssilä S., *Sens. Actuators B*, 148: 227–232, (2010).
- 32) Pati S., Banerji P., Majumder S.B., 'MOCVD grown ZnO thin film gas sensors: Influence of microstructure', *Sens. Actuators A*, 213: 52–58, (2014).
- 33) He J., Rao X., Yang C., Wang J., Su X., Niu C., 'Glucose-assisted synthesis of mesoporous maghemite nanoparticles with enhanced gas sensing properties', *Sens. Actuators B*, 201: 213–221, (2014).
- 34) Blauw A. M., Van Anh T.D., Calama M.C., Brongersma S.H., 'Metal Oxide ALD Films for Low Power Sensor Applications', *ECS Trans.*, 50 (13): 137–140, (2013).
- 35) Demirel N., 'Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si Yapısının CO ve CO<sub>2</sub> gazlarına Karşı Duyarlılığının İncelenmesi', *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2013).
- 36) Hara T., Ishiguro T., 'Oxygen sensitivity of SrTiO<sub>3</sub> thin film prepared using atomic layer deposition', *Sens. Actuators B*, 136: 489–493, (2009).
- 37) Karaduman I., Yıldız D.E., Sincar M.M., Acar S., 'UV light activated gas sensor for NO<sub>2</sub> detection', *Mater. Sci. Semi. Processing*, 28: 43–47, (2014).
- 38) Cho S., Kim D.-H., Lee B.-S., Jung J., Yu W.-R., Hong S.-H., Lee S., 'Ethanol sensors based on ZnO nanotubes with controllable wall thickness via atomic layer deposition, an O<sub>2</sub> plasma process and an annealing process', *Sens. Actuators B*, 162: 300–306, (2012).